

## Відгук офіційного опонента

на дисертацію Алькіна Антона Олеговича «Феноменологія множинного народження частинок у високо енергетичній взаємодії протонів», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика

Експериментальні дослідження розсіяння елементарних частинок є основним джерелом вивчення фізичних явищ, які визначають стан багатьох прикладних напрямків сучасної науки. Теоретичні та математичні дослідження матриці розсіяння, які почалися в середині минулого століття в роботах Фейнмана, були, мабуть, основним поштовхом для розвитку як теорії так і експерименту.

Сучасною фундаментальною теорією фізики частинок є Стандартна Модель, суттєвою частиною якої є квантова хромодинаміка (КХД), яка описує сильну взаємодію. Однак її практичні застосування обмежені пертурбативними процесами, та статичними розрахунками на решітці. Не існує фундаментального опису процесу адронізації, тобто переходу ядерної матерії із кварк-глюонного стану до спостережуваних частинок. На даний час існує величезна кількість експериментальних даних з сильної взаємодії, зокрема для зіткнення адронів. Оскільки аналіз експериментальних даних є практично неможливим без симуляції процесів, що досліджуються, феноменологічні моделі відіграють дуже важливу роль у побудові детальної картини сильної взаємодії. Особливу увагу приділяють моделям, що здатні відтворити розподіли загальних характеристик адронної взаємодії. Такі моделі дозволяють відокремити модельну похибку від детекторних ефектів та значно підвищити точність вимірювань, що, у свою чергу, дозволяє перевіряти адекватність теоретичних моделей. Дисертаційна робота А.О. Алькіна виконана у цьому напрямку та присвячена вдосконаленню феноменологічного опису загальних характеристик сильної взаємодії адронів, таких як перерізи розсіяння та розподіли множинності заряджених частинок, що народжуються в акті взаємодії.

В першому розділі, методом дисперсійних співвідношень для амплітуди розсіяння в рамках теорії Редже, розглянуто різну можливу асимптотику при високих енергіях, на основі експериментальних даних для повних перерізів розсіяння адронів (мезонів, антимезонів, протонів та антипротонів на протонах)



та відношення  $\rho$  реальної до уявної частини амплітуди при  $t = 0$ . Показано, що для енергій менш ніж 7 TeV оддеронним (тобто непарним по відношенню до кросинг-симетрії) внеском в амплітуду можна знехтувати. Також показано, що лідувача сингулярність у вигляді подвійного полюса є несумісною з даними, на відміну від простого та потрійного полюсів. Екстраполяція моделей узгоджується із даними експериментів на LHC, що з'явилися пізніше.

Оскільки Редже сингулярність у вигляді простого полюса порушує вимогу унітарності, використовуються різноманітні схеми унітаризації. В роботі за допомогою ейкональної та U-матричної схеми унітаризації описано масив даних із диференціальних перерізів протон-протонного та антипротон-протонного розсіяння як функції переданого імпульсу. Модельні криві достатньо добре узгоджуються з даними, але в роботі продемонстровано, що подальше вдосконалення опису потребує нелінійних моделей.

Також в цьому розділі вперше із даних з диференціальних перерізів при енергії 7 TeV реконструйовано залежність амплітуди розсіяння та непружного профілю від прицільного параметра. Показано, що при цій енергії порушується границя чорного диска, тобто  $\text{Im } H(s, b = 0) > \frac{1}{2}$ , що також приводить до зміщення піку непружного профілю  $G(s, b)$  в область  $b > 0$ . Цей факт має фундаментальні наслідки для картини сильної взаємодії адронів на високих енергіях, зокрема спотворює ейкональну апроксимацію, що дуже широко використовується в цій галузі.

В другому розділі розглянуто дані розподілів народжуваності кількості заряджених частинок (далі **множинності**), які були отримані в експерименті ALICE на LHC при зіткненні протонів. Наведений детальний опис негативно-біноміального розподілу ймовірностей (НБР) і помічено, що вже при енергії 0.9 TeV експериментальні розподіли помітно відрізняються від НБР. Автором дисертації показано, що форма розподілів має ознаки суміші більш ніж двох класів подій для вибірки непружних зіткнень за виключенням односторонньої дифракції, а якісний опис досягається випуклою сумою двох НБР з незалежними параметрами. Це означає, що множинне народження частинок обумовлюється якнайменше двома механізмами в області множинностей, що не обумовлена дифракцією. Продемонстровано, що точність вимірювання розподілів множинності заряджених частинок суттєво залежить від якості теоретичних та феноменологічних моделей, які використовуються для симуляції детекторних ефектів. Зазначено, що сучасні моделі, які реалізовано у вигляді генераторів



подій, не здатні відтворити розподіли множинності в зіткненнях адронів повністю, однак це обумовлюється низкою факторів.

В третьому розділі побудовано феноменологічну модель, що пов'язує гіпотетичну множинність в необмеженому фазовому просторі фінального стану із розподілами в певних інтервалах псевдохуткості. Запропонована модель дозволяє одночасно описати розподіли множинності в обмежених фазових просторах за допомогою одного модельного розподілу у повному фазовому просторі. Важливим наслідком такого представлення розподілів множинності є відсутність КНО-скейлінга. Цей підхід відкриває нові можливості для моделювання та побудови експериментальних спостережуваних, що є більш придатними для порівняння з моделями.

В підсумку зазначу, що дисертація А.О. Алькіна є завершеною науковою працею з оригінальними результатами. Висновки є належно обґрунтованими, де це можливо обговорюються можливі недоліки та похибки обраних підходів. Обговорюються також можливі шляхи наступних досліджень.

Хочу звернути увагу на деякі недоліки роботи, зокрема:

- у Розділі 2, в параграфі, що стосується порівняння моделей, реалізованих генераторами подій, з експериментальними даними, не обговорюються особливості моделей в окремих генераторах, та відповідні фізичні наслідки; аналогічне обговорення було б доречним також у параграфі, що стосується структур в розподілах множинності.
- У пункті 2.4.1 на початку йдеться про рисунок 2.1, але сам рисунок не відповідає тексту - на ньому відсутні дані експериментів, інших ніж ALICE. Та й взагалі, майже всі рисунки і таблиці не вдало розміщені, бо розривають основний текст, що утруднює процес читання.
- Розділи дисертації хоч і є логічно пов'язаними один з одним, але автор недостатньо уваги акцентував на цьому питанні.
- В описі результатів дуже велика кількість аббревіатур і нових понять, які в україномовній літературі не є звичними. Варто було б перед змістом виділити сторінку чи дві для пояснення цих термінів і скорочень.
- В деяких місцях тексту зустрічаються слова на англійській (наприклад союз "and" на стор. 49 та 63); є також русизми (на стор. 66 вжито « Все це призводить до виводу...» замість «...призводить до висновку...»).

Ці недоліки не зменшують наукової цінності роботи та актуальність і новизну її результатів. Результати роботи опубліковано у провідних наукових виданнях;

вони обговорювалися на різних рівнях, що включає міжнародні конференції. Публікації є відомими іншим науковцям та отримали розвиток у роботах інших авторів. Автореферат дисертації відповідає змісту роботи й повністю відображає її основні положення.

Дисертація А.О.Алькіна «Феноменологія множинного народження заряджених частинок у високоенергетичній взаємодії протонів» відповідає вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Антон Олегович Алькін заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - теоретична фізика.

Головний науковий співробітник  
відділу математичної фізики  
Інституту математики НАНУ,  
доктор фізико-математичних наук  
професор



О.Л.Ребенко

Підпис О.Л.Ребенка засвідчую:  
Вчений секретар  
Інституту математики НАН України  
кандидат фізико-математичних наук



І.В. Соколенко